CHAPITRE 1

HISTOIRE DE LA TRIBOLOGIE

Le nom tribologie, créé en 1966, vient du Grec "τριβειν" Tribein : frotter, et "λογος" logos : parole, étude ou science ; ainsi la tribologie est l'étude ou la science, du frottement. Plus généralement la tribologie regroupe l'étude de 1a lubrification, du frottement et de l'usure des éléments de machine.

Il faut tout d'abord remarquer que le frottement ne présente pas que des aspects négatifs, ainsi la tenue de route d'une automobile dépend directement du frottement entre les pneumatiques et la route. De même sans l'existence du frottement, l'homme serait incapable de marcher. Enfin, si l'homme a appris à maîtriser le feu, il y a plus de 100000 ans, c'est en faisant frotter un morceau de bois dur à l'intérieur d'un morceau de bois tendre.

Cependant, dès la construction des premiers mécanismes, l'homme a cherché à supprimer l'usure et à diminuer le frottement pour réduire les efforts. Pour préciser l'ampleur du problème on peut citer le cas des automobiles actuelles pour lesquelles plus du quart de la puissance indiquée du moteur est perdue en frottement dans le moteur et dans la transmission.

1 - LA PERIODE PREHISTORIQUE

Les premiers paliers fabriqués par l'homme sont sans doute les crapaudines de porte qui consistaient en un axe en bois tournant à l'intérieur d'un creux pratiqué dans du bois ou dans une pierre. Des éléments en pierre datés de 2500 ans avant J. C. ont ainsi été retrouvés en Mésopotamie (fig. 1).

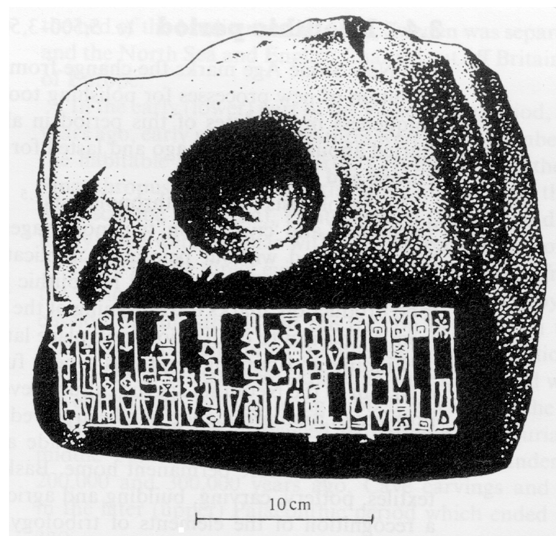


Fig. 1 : Crapaudine de porte, Mésopotamie 2500 ans avant J. C. [1].

De même, la fabrication des poteries a conduit très tôt, vers 4000 ans avant J. C. à la réalisation des tours de potier qui comportaient un pivot ; ce pivot pouvait être en bois, en pierre ou même en terre cuite. Ainsi, un pivot de tour en pierre, daté de 2000 ans avant J. C., a été retrouvé à Jéricho. Ces pivots étaient sans doute lubrifiés à l'aide soit de bitume soit de graisse animale.

* La première version de ce texte a été publiée dans le bulletin de l'Union des Physiciens n° 689, pp. 1531-1560 en 1986. Une deuxième version a fait l'objet du premier chapitre de l'ouvrage "Lubrification hydrodynamique- Paliers et Butées" par J. Frêne et al, publié aux Editions Eyrolles en 1990 dans la collection des Etudes et Recherches de Electricité de France, ouvrage traduit en anglais et publié par Elsevier en 1997. La version actuelle a été publiée dans Mécanique et Industrie, Elsevier, Vol. 2, pp 263-282, 2001.

Deux livres nous ont été particulièrement utiles pour la rédaction de cet article. Le premier sans lequel nous n'aurions pas pû faire cet exposé est le livre de Duncan Dowson : « History of Tribology »[3]. Le second livre est de Bertrand Gilles : « Histoire des techniques »[17].

Dans le domaine des transports, la roue, et donc le chariot, ont été inventés vers 4000 ans avant J. C.. Les roues en bois étaient pleines et parfois formées de plusieurs morceaux assemblés entre eux. Plus tard, leur périphérie a été cloutée pour réduire l'usure. Enfin, la roue à rayons est apparue vers 2000 ans avant J. C. ; elle comportait tout d'abord 4 puis 6 ou 8 rayons, ce qui la renforçait considérablement. Les chariots montés sur roues ne permettaient pas le transport de lourdes charges ; pour cela, l'homme a utilisé des rouleaux de bois intercallés entre une piste en bois formée de gros troncs d'arbres équarris et l'objet à transporter. La démonstration de ce procédé a été réalisée en 1979 sur le plateau d'Exoudun près de Saint-Maixent (Deux-Sèvres) sous la direction de J. P. Mohen, conservateur du musée de Saint-Germain-en-Laye. La figure 2 montre une photographie de cette démonstration pendant laquelle 170 hommes ont déplacé sur plusieurs centaines de mètres la copie en béton d'une table de dolmen de 32 tonnes. Par ailleurs, un bas-relief assyrien à Kouyunjik, datant de 700 ans avant J. C., montre clairement l'emploi de rouleaux en bois pour déplacer une statue (fig. 3). Ce type de procédé connu depuis plus de 5000 ans permet de réduire le frottement en remplaçant le frottement de glissement par le frottement de roulement généralement plus faible.



Fig. 2 : Reconstitution du transport d'un dolmen, plateau de Bougon, Exoudun, Deux-Sèvres, 1979 (doc. NOUVELLE RÉPUBLIQUE).

Pour transporter les lourdes charges, les Egyptiens faisaient glisser celles-ci sur des chemins réalisés sans doute en bois, et lubrifiés abondamment à l'avant de l'objet à déplacer. Plusieurs bas-reliefs montrent cette méthode de transport. Le plus ancien provient de la tombe de Saqqara et date de 2400 ans avant J. C. et montre le déplacement de la statue de Ti. On voit très clairement un homme placé devant la statue et versant du liquide, sans doute de l'eau ou de l'huile, pour faciliter le glissement ; c'est le premier exemple connu de la lubrification. Un autre bas-relief daté de 1880 ans avant J. C., et provenant de la tombe de Tchuti Hetep à El Bersheh montre le même procédé de transport (fig. 4). Cependant l'homme qui verse de l'eau est maintenant sur le piédestal de la statue et non plus devant où il risquait de se faire écraser ; l'importance de la lubrification est ainsi reconnue.

La roue existait évidemment à la même époque en Egypte mais le chariot n'était utilisé que pour le transport des objets légers ou pour la guerre ; il semble que vers 1400 ans avant J. C., la graisse de mouton ou de bœuf ait été utilisée pour lubrifier les paliers des roues de chariots.

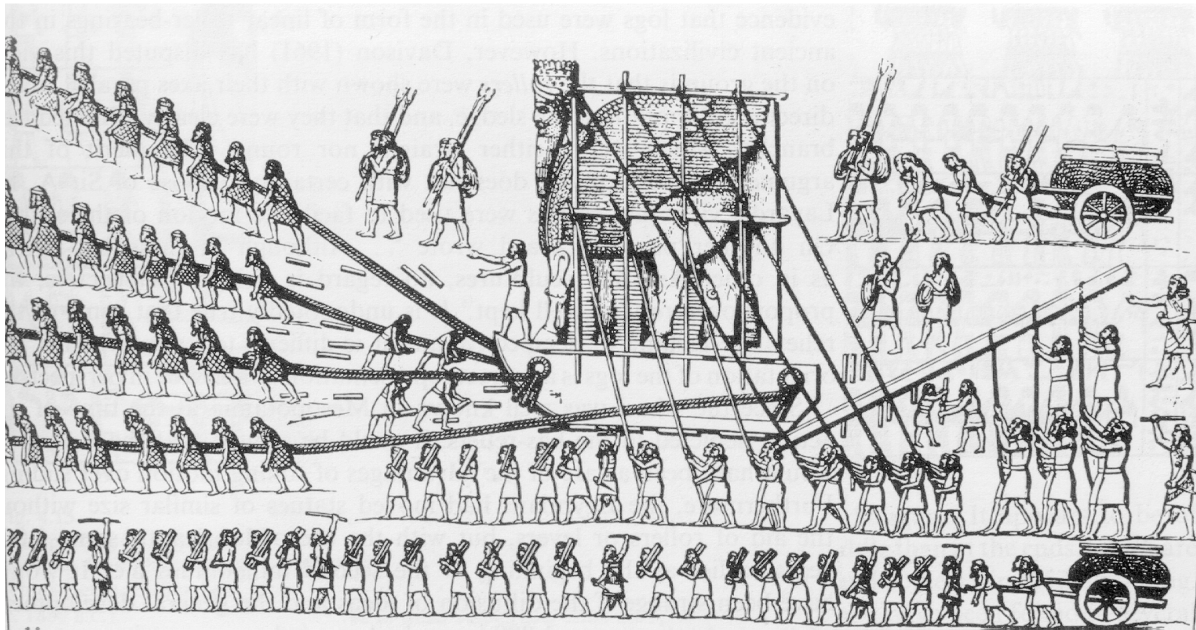


Fig. 3 : Bas-relief restauré à Kouyunjik, Assyrie, 700 avant J. C. [2].

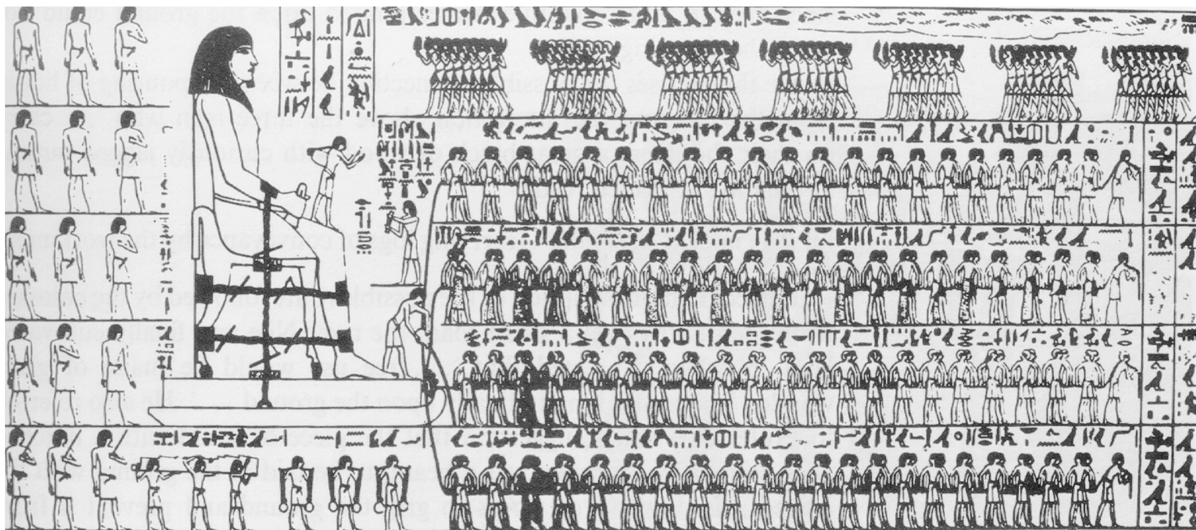


Fig. 4 : Transport de statue, tombe de Tchuti Hetep, El-Bersheh, Egypte, 1880 avant J. C. [3]

La roue à rayons est apparue aux Indes vers 2500 ans avant J. C. et en Chine vers 1500 ans avant J. C. La copie d'un chariot chinois à roues cerclées de fer et datant de 255 ans avant J. C. est présentée fig. 5. Ce chariot très particulier comporte une statue dont la rotation est reliée au mouvement des roues par l'intermédiaire de 2 trains d'engrenages et d'un différentiel. L'écartement entre les roues est égal au diamètre des roues et le rapport de transmission des 2 trains d'engrenages est égal à 1. Ainsi, quel que soit le chemin parcouru par le chariot, sur un sol plat, le bras de la statue reste constamment pointé dans la même direction (le sud), sous réserve qu'il y ait roulement sans glissement entre les roues et le sol. Ce chariot était sans doute utilisé par les Chinois pour s'orienter lors de la traversée du désert de Gobi.

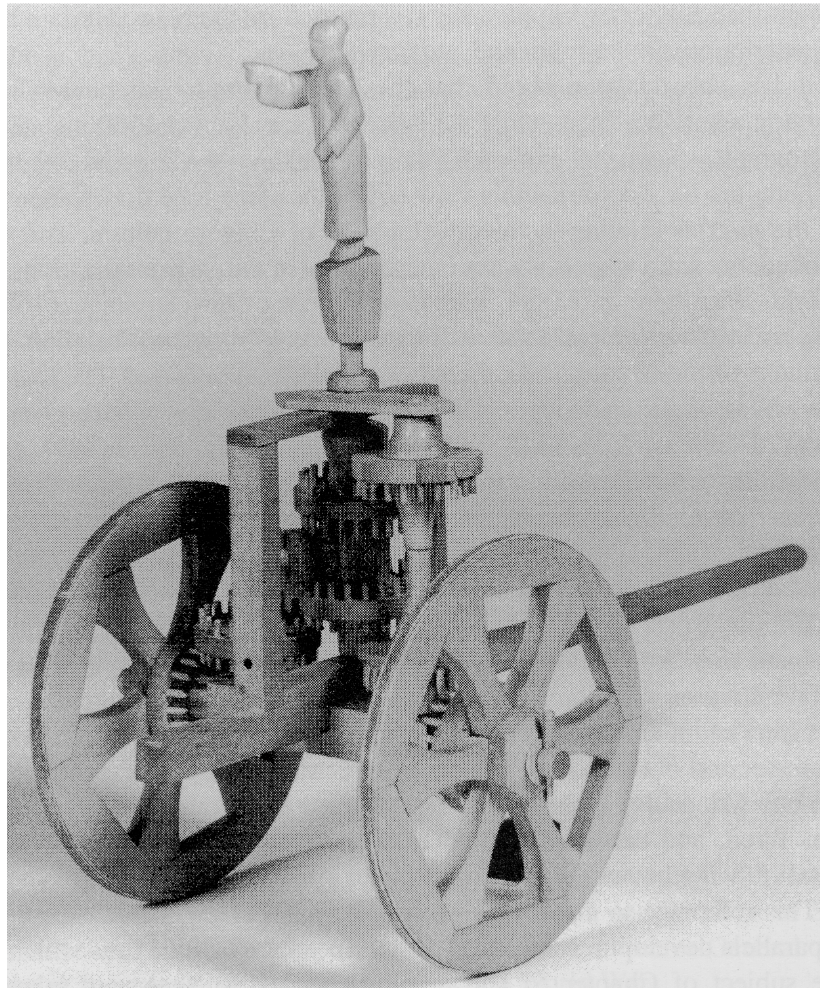


Fig. 5 : Chariot chinois utilisé pour s'orienter, 255 avant J. C. [3].

2 - LA PÉRIODE GRECQUE ET ROMAINE

Les Grecs et les Romains ont développé l'usage de la roue ; ils connaissaient l'emploi des huiles végétales et animales comme lubrifiant ainsi que celui du bitume et des huiles de pétrole.

Par ailleurs, les Grecs ont inventé l'engrenage ; la vis serait due à Archytas et Aristote, Archimède et d'autres auteurs moins connus décrivent le principe de différents engrenages. De même Heron d'Alexandrie utilise l'arbre à came. En fait, les Grecs disposaient de tous les éléments nécessaires aux grands progrès techniques sauf le système bielle manivelle inventé au XIVe siècle. Cependant il n'y eut pas réellement de développement du machinisme pour différentes raisons dont les principales sont sans doute le manque de bois et d'énergie hydraulique, les problèmes de transport liés à un réseau routier insuffisant, l'existence de l'esclavage et surtout une forme de pensée qui ne reconnaît que le raisonnement pur et la démonstration rigoureuse et ne laisse pas de place à la logique expérimentale.

Les Romains ont utilisé et développé les techniques mises au point par les Grecs. Des progrès importants ont été réalisés pour produire l'huile d'olive et pour moudre le blé, ainsi les moulins à eau ont été utilisés vers 120 ans avant J. C.. Un exemple intéressant est le Trapetum dont plusieurs exemplaires ont été retrouvés dans les fouilles d'Olyntha (Ve siècle avant J. C.) et qui permettait d'écraser et de dénoyauter les olives (fig. 6). Il comportait deux meules (orbis), hémisphériques, dressées verticalement et soutenues par un axe horizontal en bois

(Cupa) tournant autour d'un pivot central (Columella). La meule gisante (Mortarium) était une cuve de pierre dont les parois épousaient la forme des meules courantes. On note aussi la présence d'une bague (Cunica) sans doute en métal qui évitait une usure trop rapide de l'arbre en bois ; c'est un des premiers exemples de palier.

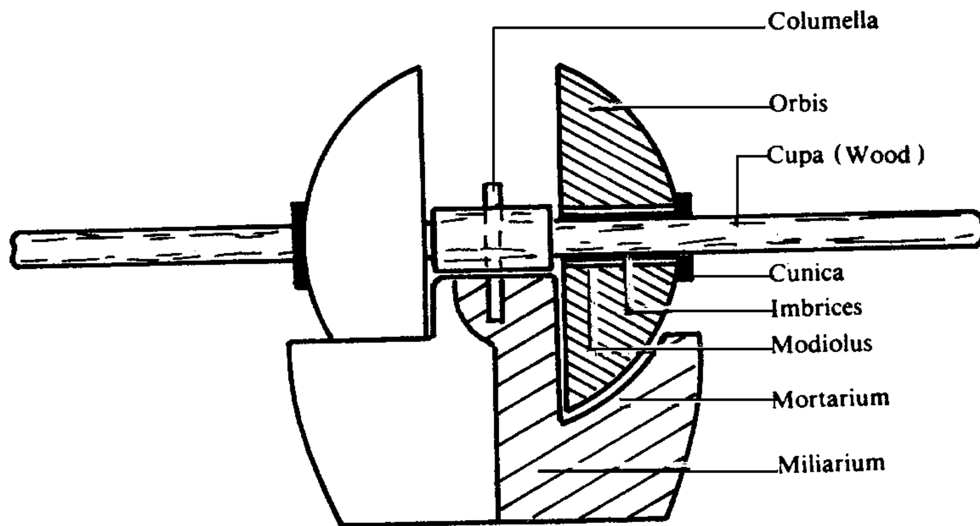


Fig. 6 : Un trapetum pour écraser les olives [4].

De même pour réduire l'usure des semelles de chaussures, les Romains utilisaient des semelles cloutées de fer dont l'emploi n'a été en France abandonné que très récemment.

Enfin les Romains connaissaient la butée à billes et à rouleaux coniques ainsi que les glissières à rouleaux cylindriques. Des éléments de butées ont été découverts dans une galère romaine retrouvée au fond du lac Nemi en Italie. Cette galère, coulée vers l'an 40, a été découverte en 1895 et les fouilles ont duré jusqu'en 1933 après que Mussolini ait fait assécher le lac. Les chemins de roulement étaient en bois ; les billes d'une première butée et les rouleaux cylindriques étaient en bronze et comportaient des axes qui les maintenaient dans leur logement. Les rouleaux coniques d'une deuxième butée étaient en bois. L'utilisation de ces butées n'est pas connue ; certains auteurs ont suggéré qu'elles étaient utilisées soit sur des treuils ou des cabestans, soit pour orienter une statue ou une horloge solaire.

A la même époque, c'est-à-dire il y a plus de 2000 ans, les Celtes utilisaient des chariots pour transporter leurs guerriers près des champs de bataille ; la légèreté et la solidité des roues de ces chariots étaient étonnantes pour l'époque. Des chariots datant du 1er siècle avant J.-C., retrouvés à Dejbjerg au Danemark ont été restaurés et se trouvent actuellement au musée national de Copenhague (fig. 7). Ces chariots ressemblent sur bien des points aux chariots utilisés dans nos campagnes il y a encore moins de cinquante ans. Les roues cerclées de fer comportaient 14 rayons en charme et un moyeu de chêne. Le cœur des moyeux était formé de 2 éléments de révolution en bronze, la partie liée à l'axe du chariot comportait deux collerettes extérieures et la partie liée à la roue présentait 22 rainures internes partiellement cylindriques. Lors du montage, des cylindres de bois étaient introduits dans ces rainures, ils assuraient ainsi l'assemblage des 2 éléments, par ailleurs, même si ces cylindres ne tournaient pas, ils permettaient de réduire le frottement et évitaient l'usure des pièces métalliques ; de plus, ils étaient faciles à changer. C'était en quelque sorte un compromis entre le roulement à billes et le palier lisse.

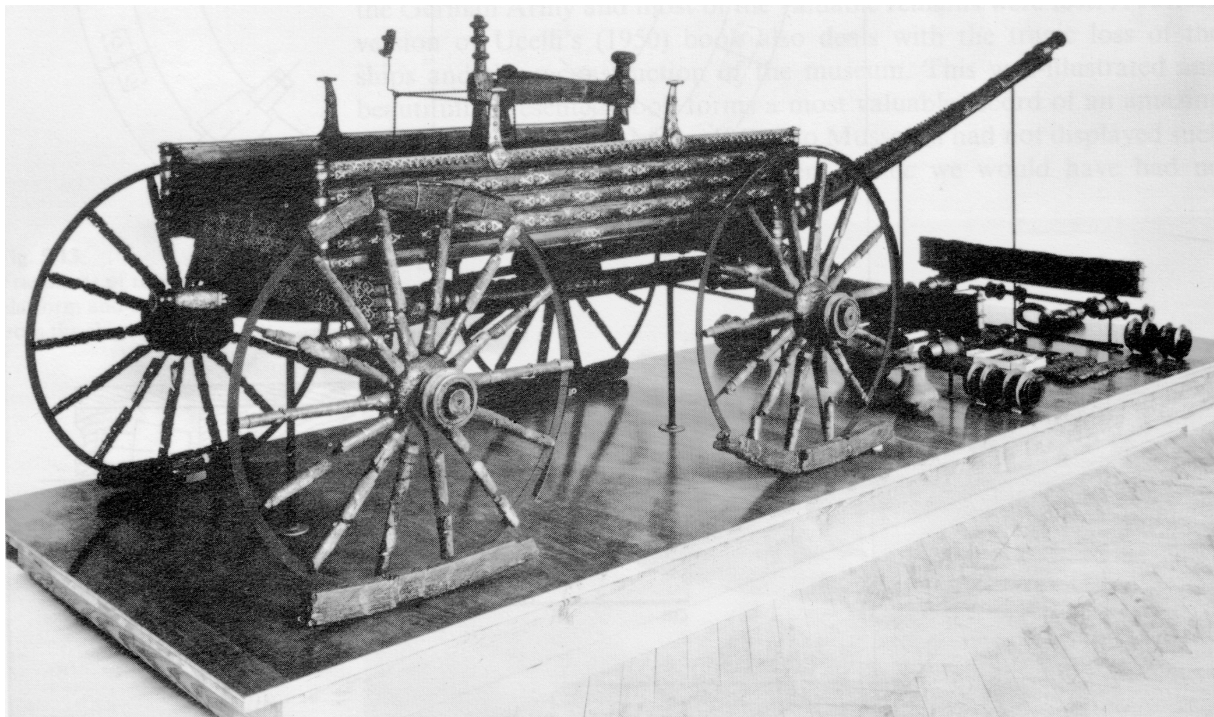


Fig. 7 : Chariot Celte (doc. MUSÉE NATIONAL DE COPENHAGUE).

3 - MOYEN AGE ET RENAISSANCE

Après la chute de l'Empire romain et jusqu'au début du Moyen Age, s'est produit une régression dans le développement de la technique et donc de la tribologie, sauf dans l'empire Ottoman et en Chine où des paliers tout en métal ont sans doute été utilisés dès l'an 900. Il semblerait que des moulins à vent aient été inventés en Perse au VIIe siècle ; en tout cas, il est certain que les moulins à vent existaient en Perse au Xe siècle. De même, le fer à cheval clouté pour éviter l'usure des sabots aurait été créé à Bizance à partir du VIIe siècle. Le musée de Crécy et le musée de Saumur présentent des exemplaires de fers à cheval qui seraient du IXe siècle.

La figure 8 présente une pompe à godets entraînée par une roue à aube (le bœuf est en bois, c'est un leurre) elle est tirée du livre de Razzaz el Cezeri [5] écrit au XIIe siècle (Olaganüstü mekanik araçlarin bilgisi hakkinda kitap : le livre des dispositifs mécaniques ingénieux). La plus ancienne copie de cet ouvrage est au musée Topkapi à Istanbul, elle date de 1206 et présente différents types d'automates.

Malgré cela, il faudra généralement attendre jusqu'au XIIe siècle pour voir apparaître de nouveaux progrès.

Dans le domaine agricole, les instruments de labour se sont perfectionnés : l'araire dental grec qui, quelquefois, comportait un soc en fer avait été muni par les romains d'un coutre en fer. Au Moyen Age, la charrue dont l'emploi se généralise comporte un coutre, un soc asymétrique et un versoir. Elle est généralement toute en bois, mais le versoir présente souvent des incrustations, ce sont des pierres serties dans le bois pour éviter l'usure (fig. 9). Des éléments de charrue de ce type ont été retrouvés en différents endroits d'Europe (Danemark, France ...). Il faut souligner à ce sujet que la charrue toute en fer ne date que du XIXe siècle.

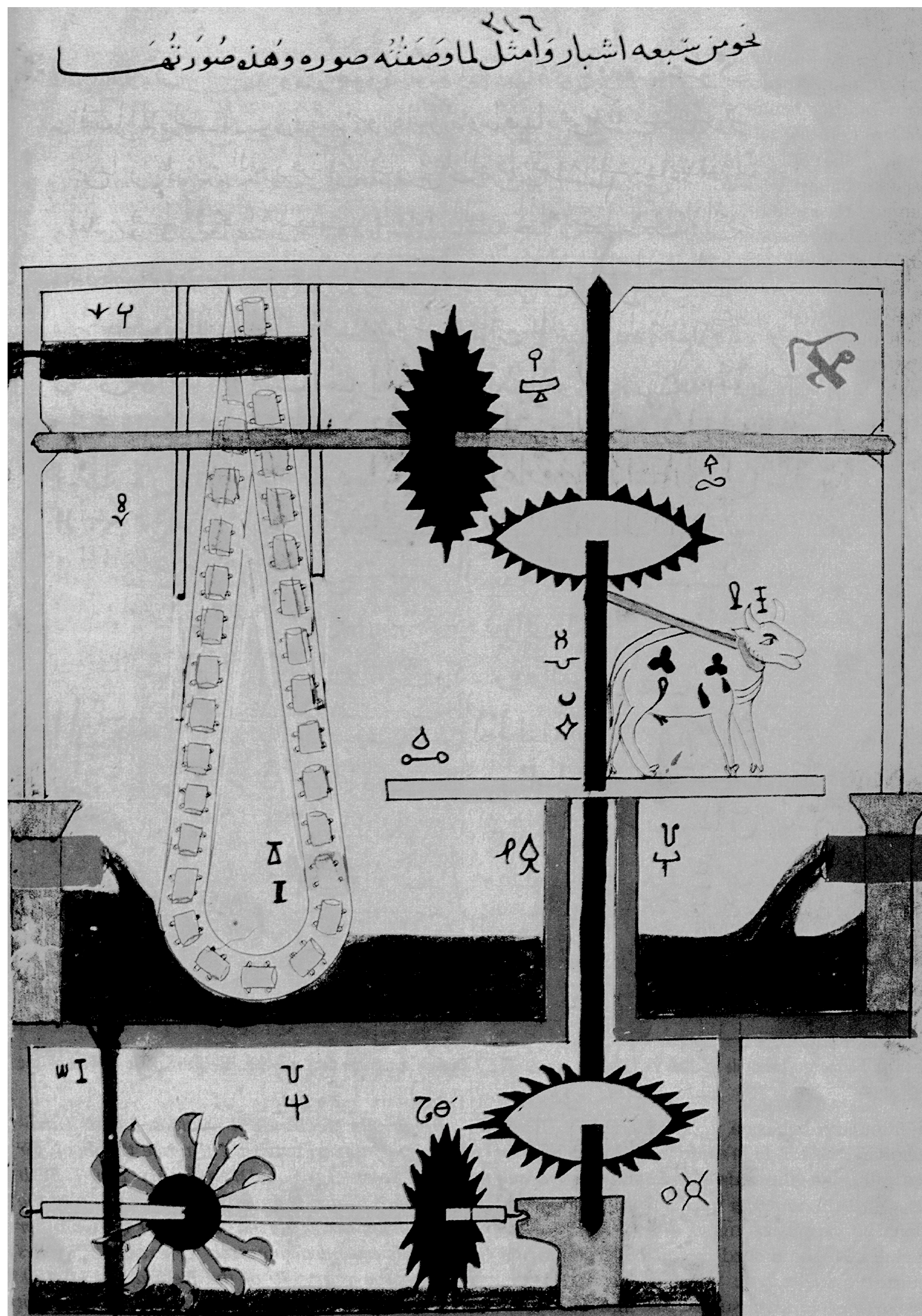


Fig. 8 : Pompe à godets entraînée par une roue à aubes [5] (doc. musée Topkapi)

Vers la fin du Moyen Age, de nombreuses horloges mécaniques ont été réalisées. Les axes en fer des premières horloges étaient supportés par des coussinets en fer qui étaient vraisemblablement lubrifiés avec des huiles animales ou minérales ; ultérieurement des coussinets en bronze ont permis de réduire le frottement et l'usure.

Du point de vue technique, le XIIe siècle voit se généraliser l'utilisation de l'énergie hydraulique ainsi que le developpement, en Europe, des moulins à vent. Enfin, c'est à partir du XIIIe siècle que de nombreux traités techniques vont être publiés. Le plus ancien est celui de l'architecte Villard de Honnecourt qui date de 1250 et présente, outre de nombreux mécanismes déjà plus ou moins connus, une scie hydraulique à ressort.



Fig. 9 : Scène de labour avec une charrue comportant des incrustations de pierres, 1340 (doc. BRITISH LIBRARY).

Après le Moyen Age, la période de la Renaissance est marquée par un développement dans tous les domaines et naturellement aussi en tribologie. L'ouvrage "De rebus militaribus" [6] connu sous le nom de "De machinis libri decem" écrit en 1449, par Mariano Daniello di Jacopo dit Tacola, présente deux systèmes bielle manivelle.

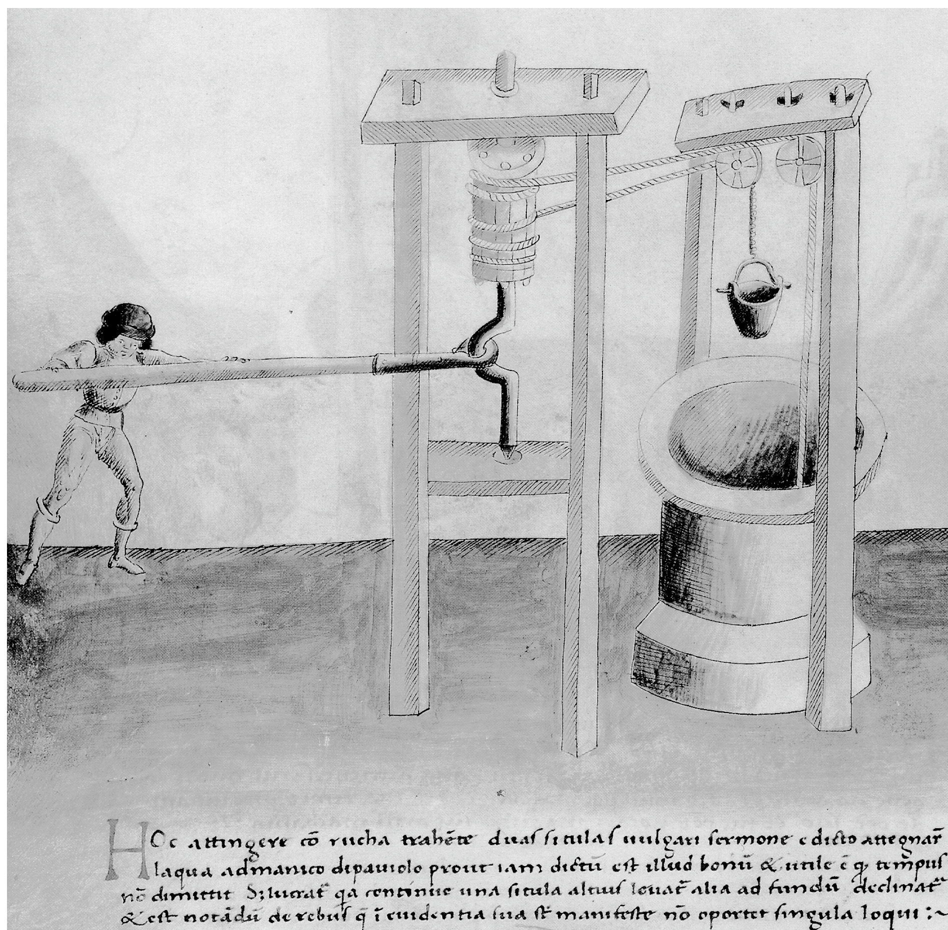


Fig. 10 : Système bielle manivelle pour puiser de l'eau [6].

L'un concerne une façon de puiser de l'eau à l'aide d'un cabestan qui tire alternativement deux seaux (fig. 10) et est appelé "puisage à tête de papillon". Il est constitué d'une barre qui sert de bielle et d'un arbre en fer coudé en forme de vilebrequin qui entraîne le cabestan. Ce système permet de gagner du temps car un seau est toujours soulevé pendant que l'autre est envoyé au fond. Le second présente un petit moulin avec le même système bielle-manivelle qui entraîne la meule. Ce mécanisme nécessitait un effort important pour celui qui manœuvrait la bielle et n'était pas très efficace. Il s'appelait "moulin à manche de papillon" et se trouverait pour la première fois dans "Texaurus" de Guido da Vigevano, publié 50 ans plus tôt. Ainsi le système bielle manivelle aurait été inventé entre le XIIIe et XIVe siècle.

La période de la Renaissance est aussi celle de Léonard de Vinci né en 1452 près de Florence et mort en 1519 au Clos-Lucé près d'Amboise. Il fut non seulement un grand peintre et un grand sculpteur mais aussi un physicien et un mécanicien remarquable. Dans beaucoup de domaines, il a été un précurseur exceptionnel, à l'imagination fertile, mais il a aussi su utiliser et parfois même copier les documents de son époque. C'est dans le domaine de la technologie et des sciences appliquées que les inventions de Léonard de Vinci sont les plus remarquables. Cependant, nombre de ses inventions sont restées théoriques et certaines n'ont été réinventées que récemment. On peut voir certains de ses projets réalisés à partir de ses croquis au Clos-Lucé. Dans le domaine de la tribologie, Léonard de Vinci fut le premier à quantifier les efforts de frottement et à introduire le coefficient de frottement. De nombreux dessins extraits du Codex Atlanticus, du Codex Arundel et du Codex Madrid I montrent des schémas d'expériences pour mesurer le frottement et proposent des solutions technologiques pour le réduire. La figure 11 présente les dispositifs utilisés pour déterminer le frottement entre deux corps et pour montrer que la surface apparente de contact n'a pas d'influence sur la valeur du frottement. Léonard de Vinci a proposé pour réduire le frottement dans les paliers de remplacer le glissement de l'arbre dans l'alésage par le roulement de l'axe sur des galets.

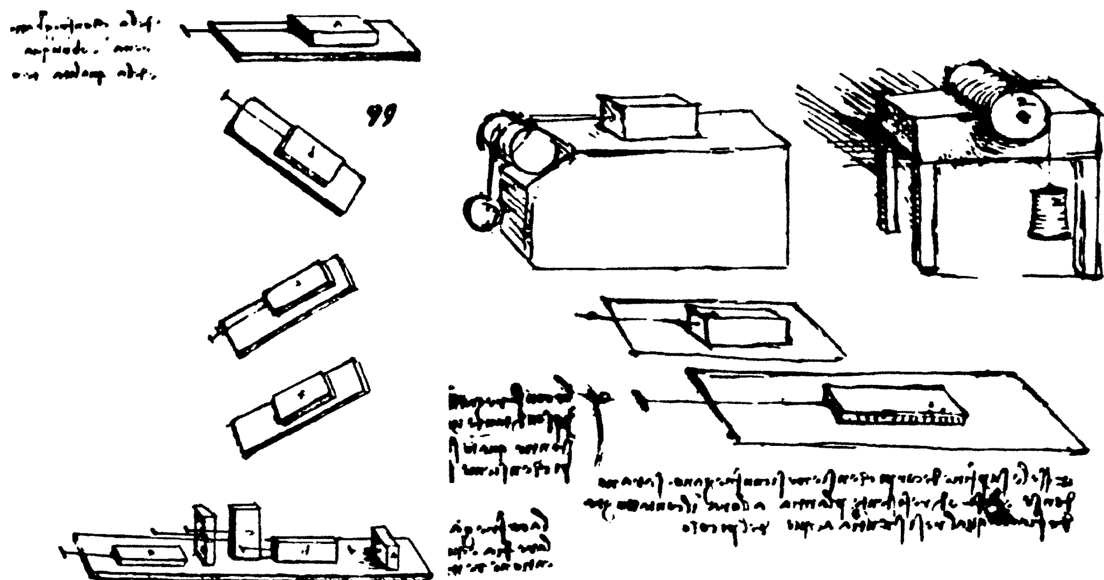


Fig. 11 : Dispositifs d'essais pour étudier le frottement, Léonard de Vinci [7].

De même, pour réduire le frottement des pivots, il propose un système de 3 billes sur lesquelles vient s'appuyer l'axe conique du pivot (fig. 12). Un autre schéma présente un roulement à billes comportant une cage pour éviter le contact entre les corps roulants et réduire ainsi le frottement. Tous les roulements actuels possèdent une cage mais celle-ci n'est

utilisée que depuis moins d'un siècle. Léonard de Vinci a par ailleurs, étudié les engrenages et a proposé des formes de denture pour réduire le frottement.

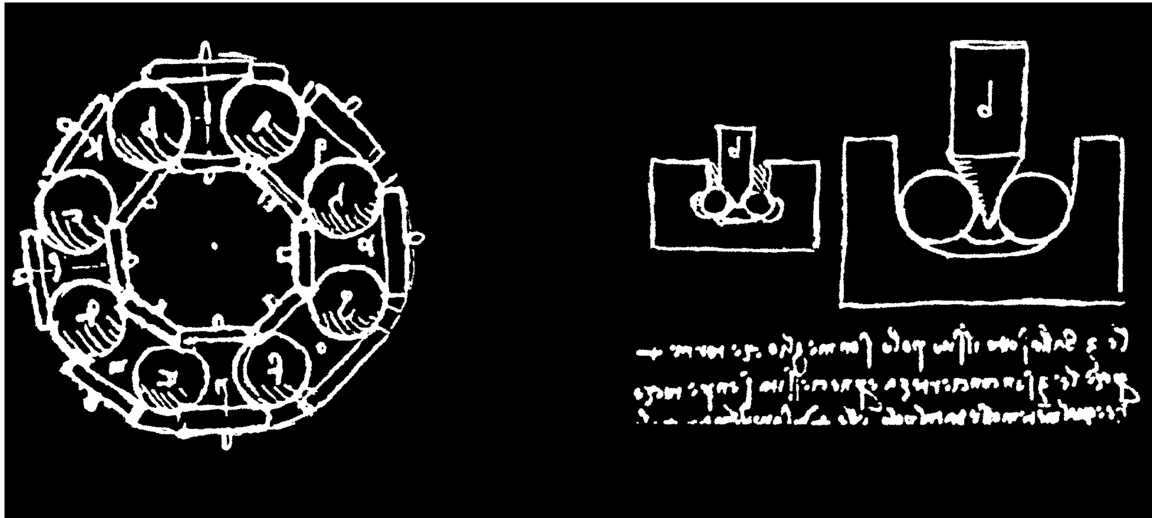


Fig. 12 : Roulement à billes avec cage et pivot sur billes, Léonard de Vinci [8].

Ainsi, Léonard de Vinci est le premier tribologue connu ; il a apporté une contribution remarquable à l'étude des problèmes de frottement. Ses idées étaient très en avance sur les réalisations technologiques de son époque. Son certificat de décès le décrit de la façon suivante : « Léonard de Vincy, noble millanois, premier peintre et ingénieur et architecte du Roy, mescanicien d'Etat, et ancien directeur de peinture du Duc de Milan ».

4 - VERS LA RÉVOLUTION INDUSTRIELLE 1500-1750

Au XVIe siècle, le développement agricole et artisanal conduit à la construction de machines de plus en plus complexes qui utilisent des paliers et même dans certains cas des rouleaux métalliques pour réduire le frottement. Des exemples de différentes machines sont présentés dans de nombreux ouvrages parus à partir du milieu du XVIe siècle. Nous citerons Georgii Agricolae (1556), Errard de Bar le Duc (1584), Agostino Ramelli (1588) et Vittorio Zonca (1607). La figure 13 extraite de Agricola de Re Metallica, montre une pompe à chaînes et à godets actionnée par des hommes. On voit clairement le système de démultiplication à engrenages et les axes guidés par des paliers en métal. Dans son ouvrage intitulé « Teatro Nuevo di Machine et Edificü » Zonca préconise pour les paliers un arbre en acier et un coussinet en cuivre afin d'éviter l'usure. Cette solution est encore très largement utilisée aujourd'hui en remplaçant le cuivre par le bronze, alliage de cuivre et d'étain.

C'est au XVIIe siècle que les premières études sur le frottement, à l'exception de celle de Léonard de Vinci, ont été effectuées : en Angleterre Robert Hooke (1635-1703) dont les travaux en Résistance des Matériaux sont bien connus montre que la déformation des solides est en partie responsable du frottement de roulement.

En France, Guillaume Amontons (1663-1705) réalise ses expériences sur le frottement qu'il présente devant l'Académie Royale le 19 décembre 1699 dans un mémoire intitulé « De la résistance causée dans les machines, tant par les frottements des parties qui les composent, que par la raideur des cordes qu'on emploie, et la manière de calculer l'un et l'autre ».

Ce traité présente les lois dites, « lois d'Amontons » sur le frottement et qui peuvent s'énoncer ainsi :

- la force de frottement est directement proportionnelle à la force appliquée,
- la force de frottement est indépendante de la surface apparente de contact.

Ces lois qui, dans le cas du frottement sec, sont encore globalement valables aujourd'hui, ont été confirmées quelques années plus tard par Philippe de la Hire (1640-1718) et Antoine Parent (1666-1716) qui introduisit la notion d'angle de frottement.

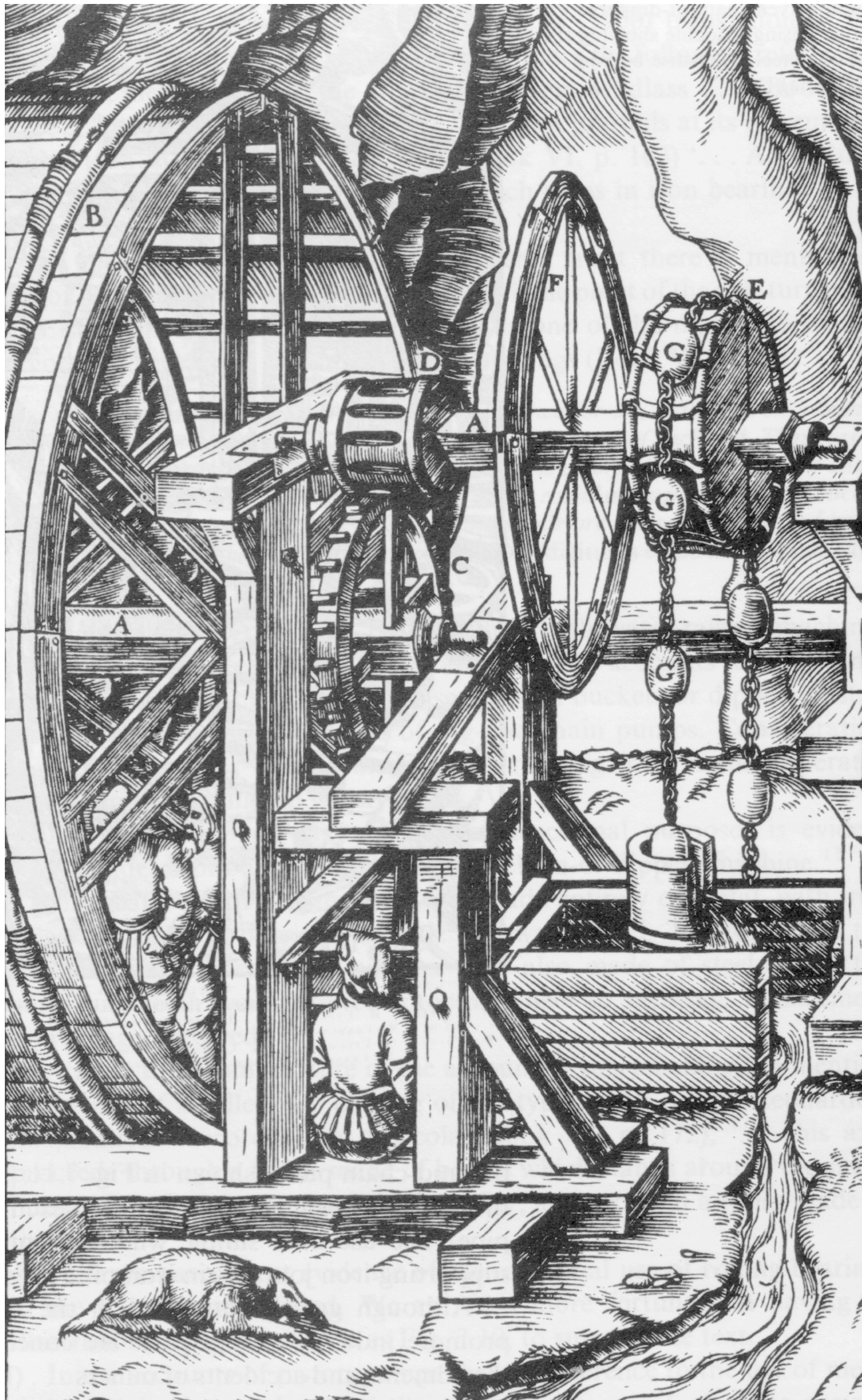


Fig. 13 : Pompe à chaîne et à godets DE RE METALLICA [9].

Au XVIII[e] siècle, Jacob Rowe réalise de nombreuses expériences sur le frottement de roulement : il publie les résultats de ses études en 1734 dans un recueil intitulé « All sorts of Wheel Carriage improved ». Il montre que l'on peut réduire très sensiblement le frottement dans les paliers en remplaçant ceux-ci par des galets entraînés en rotation par l'arbre ; c'est sous une forme modifiée l'un des systèmes proposés par Léonard de Vinci.

A la même date, toujours en Angleterre, John Théophilus Désaguliers (1683-1744) publie un ouvrage en 2 volumes intitulé : « A course of Experimental Philosophy » dans lequel il présente une étude sur l'adhérence entre deux corps ainsi que de nombreuses valeurs du frottement entre différents matériaux.

Trois années plus tard en 1737, Bernard Forrest de Bélidor (1697-1761) dans un ouvrage en 2 volumes intitulé : « Architecture hydraulique ou l'art de conduire, d'élever et de ménager les eaux pour différents besoins de la vie » propose de représenter les rugosités des surfaces par des sphères jointives. Les calculs qu'il effectue à l'aide de ce modèle, montrent que le rapport entre la force de frottement et la charge appliquée est indépendant du nombre des aspérités (sphères) et, est voisin de 0,35. Ce modèle de rugosité, de par sa simplicité a été très utilisé par les tribologues même encore très récemment.

En 1748, le mathématicien suisse Léonhard Euler (1707-1783) soumet à l'Académie des Sciences deux articles sur le frottement, dont la publication aura lieu en 1750. Dans ces articles à caractère théorique, Euler développe une approche analytique du frottement, il précise la notion de coefficient et d'angle de frottement encore utilisée aujourd'hui. Il distingue le frottement statique du frottement dynamique dont les valeurs, c'est bien connu, sont différentes ; enfin il propose de représenter la rugosité des surfaces par des pyramides.

5 - LA RÉVOLUTION INDUSTRIELLE

Le début de la révolution industrielle est marqué dans le domaine de la tribologie par Charles Augustin Coulomb (1736-1806) né à Angoulême et qui présente en 1780, un mémoire intitulé : « Théorie des machines simples en ayant égard au frottement de leurs parties et à la roideur des cordages ». Ce travail obtint le premier prix de l'Académie des Sciences au Printemps 1781 et fut publié en 1782. Coulomb a construit différents dispositifs et a réalisé de nombreuses expériences afin d'étudier de façon précise l'influence des cinq paramètres suivants, sur le frottement de glissement et dans certains cas sur le frottement de roulement :

1) nature des matériaux,
2) effet d'un lubrifiant,
3) étendue de la surface de contact,
4) charge appliquée,
5) temps de repos pendant lequel les surfaces restent en contact avant l'expérience.

La figure 14 montre quelques-uns des dispositifs utilisés par Coulomb pour étudier le frottement de glissement.

Il a ainsi déterminé de nombreuses valeurs du coefficient de frottement statique et dynamique encore globalement valables aujourd'hui. Il a aussi montré que le frottement dépendait à la fois de l'adhésion et de la déformation des surfaces. Par ailleurs il confirme les 2 lois d'Amontons et montre que dans beaucoup de cas le coefficient de frottement est indépendant de la vitesse de glissement. Cette troisième loi qui lui a été attribuée, a été appliquée pendant plus d'un siècle, à tort dans le cas du frottement lubrifié, alors que Coulomb était certainement conscient de ses limites.

Les travaux de Coulomb ont servi de référence pendant plus de 150 ans et sont encore très utilisés aujourd'hui. Les anglo-saxons le considèrent comme l'un des plus grands tribologues de tous les temps.

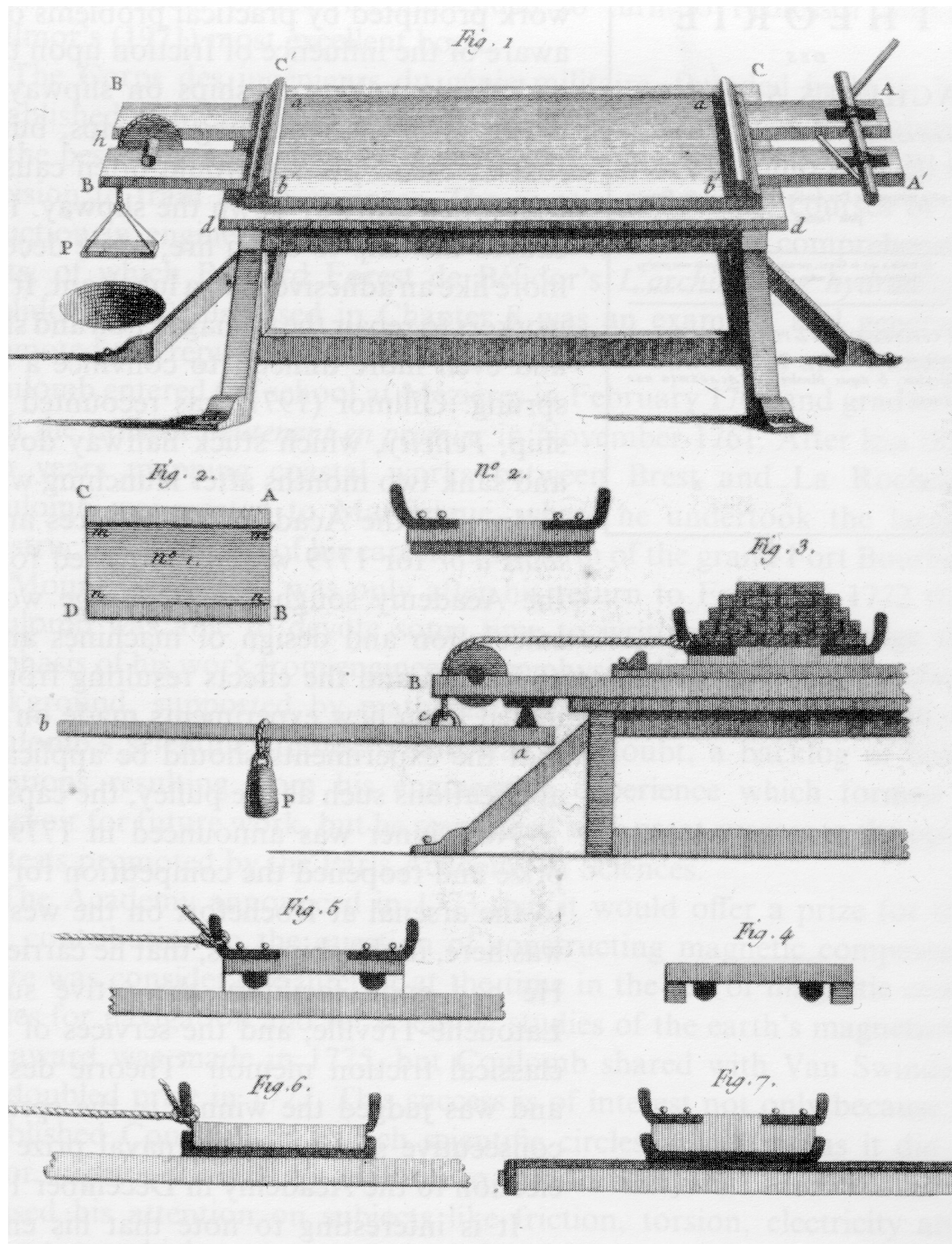


Fig. 14 : Dispositifs utilisés par Coulomb pour étudier le frottement de glissement [10].

En 1784 Samuel Vince (1749-1821) présente devant la « Royal Society » anglaise un article intitulé : « on the motion of bodies affected by friction ». Ce travail, sans doute réalisé indépendamment de celui de Coulomb, traite essentiellement des problèmes de frottement dynamique.

Du point de vue technologique le XVIIIe siècle qui correspond au tout début de la révolution industrielle voit la réalisation de nombreuses machines utilisant des paliers lisses et même des roulements. Des butées à billes, sans cage, ont été retrouvées sur différents

mécanismes : vanne de barrage à Philadelphie construit vers 1770, moulin à vent à Sprowston Norkwilk construit vers 1780. Par ailleurs le développement des machines à vapeur a entraîné l'utilisation de nombreux paliers lisses. La figure 15 montre un des paliers lisses d'une machine à vapeur de type Watt construite en 1788 et qui se trouve au musée Ford à Détroit.

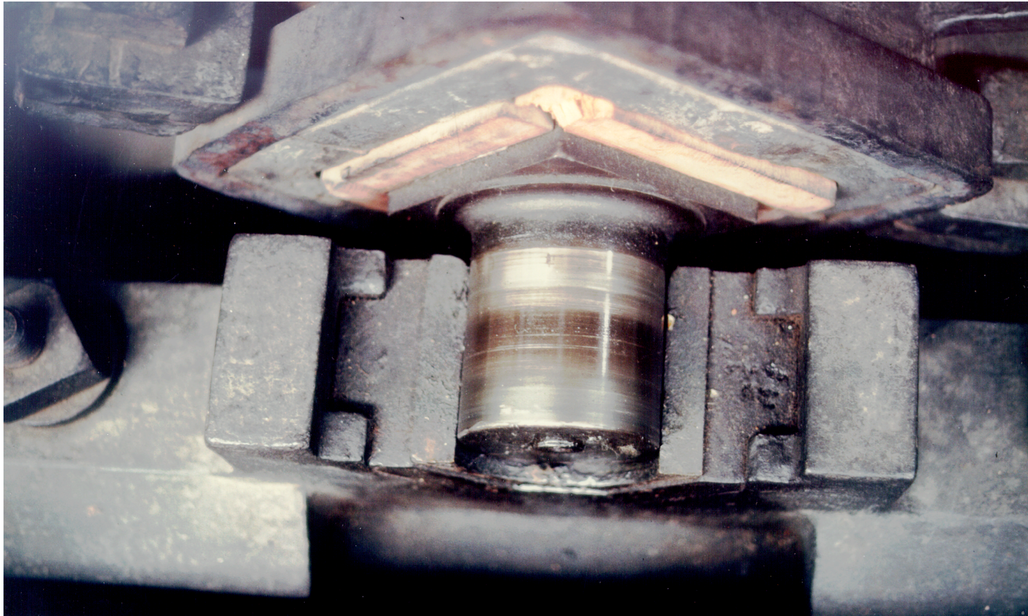


Fig. 15 : Palier lisse utilisé sur une machine Watt construite en 1788 (doc. MUSÉE FORD).

Le XIXe siècle a été marqué par des développements très importants dans tous les domaines et en particulier en Tribologie.

En ce qui concerne les lubrifiants, c'est le début du développement des lubrifiants minéraux. En effet, les principaux lubrifiants utilisés jusqu'alors étaient soit d'origine animale (suif, lard, graisses, spermaceti ...) soit d'origine végétale (huile d'olive, de colza, de palmier, d'arachide ...). Les huiles dérivées du pétrole, connues depuis très longtemps, n'étaient que peu employées. Le développement du machinisme entraîna des besoins considérables en lubrifiant. Dans le même temps, vers le milieu du XIXe siècle, le pétrole commence à être exploité aux Etats-Unis, en Ecosse, au Canada et en Russie. Le véritable départ de cette industrie est le forage du premier puits de pétrole à Titusville aux Etats-Unis par le « Colonel Drake » en 1859 (fig. 16). La France se trouve un peu à l'écart de ce mouvement car il n'y a que très peu de pétrole dans son sous-sol. Cependant, dès 1834, Selligué avait généralisé en France, l'usage du pétrole pour l'éclairage domestique. Parallèlement au développement des lubrifiants minéraux, les lubrifiants solides comme le graphite et le bi-sulfure de molybdène ainsi que les revêtements solides de type régule, alliage d'étain et de plomb, commencent à être employés ; ils sont encore utilisés de nos jours.

Des expériences très précises ont aussi été réalisées au XIXe siècle tant en frottement sec qu'en frottement lubrifié. Par ailleurs, la première étude connue sur l'usure a été réalisée en 1803 en Angleterre pour déterminer la perte de poids des pièces de monnaie.

Dans le cas du frottement sec, il faut citer Arthur Jules Morin (1795-1880) dont les travaux sur le frottement (1835) ont fait autorité en Europe à tel point qu'ils ont éclipsé pendant plus d'un demi-siècle les études de Coulomb. En effet, Arthur Morin qui fut un grand mécanicien a réalisé des essais très soignés sur le frottement de glissement et a pu ainsi préciser les valeurs du coefficient de frottement pour de nombreux matériaux. Il faut toutefois noter que ses études sur le frottement de roulement concluaient, en accord avec Coulomb, que la résistance au roulement était inversement proportionnel au rayon du galet, alors que Arsène

Dupuit en 1839 présentait une étude très précise sur le roulement qui montrait que la résistance au roulement était inversement proportionnel à la racine carrée du rayon du galet. Il s'en suivra pendant 3 ans une controverse entre les 2 chercheurs qui se termina à l'avantage de Morin, bien que dans les faits les résultats de Dupuit soient plus proches de la réalité. Il faut cependant remarquer que ce problème est très complexe : pour des matériaux élastiques, les études récentes donnent raison à Dupuit, alors que pour des matériaux rigides-plastiques fortement chargés, les résultats actuels sont plus en accord avec ceux de Morin.



Fig. 16 : Le premier puits de pétrole à Titusville, U.S.A. en 1859 (doc. SHELL).

En 1847, Gustave Adolph Hirn (1815-1890) plus particulièrement connu pour ses travaux en thermodynamique, réalise les premières expériences de lubrification hydrodynamique. Ses essais effectués sur le dispositif dont le schéma est présenté figure 17, lui ont permis en l'absence de lubrifiant de retrouver les lois d'Amontons et de Coulomb. Mais en présence de fluide, Hirn constate que pour une charge donnée, le couple de frottement à faible vitesse présente des fluctuations et est relativement élevé ; lorsque la vitesse augmente le couple devient stable, passe par un minimum puis, à température constante, sa valeur est proportionnelle à la vitesse de rotation. Il montre aussi que le couple dépend directement de la viscosité du fluide.

Il distingue ainsi le « frottement médiat » lorsqu'un film fluide (hydrodynamique) sépare les surfaces, du « frottement immédiat » lorsque le film est rompu. Il constate que pour de faibles charges, l'eau et même l'air peuvent être de très bons lubrifiants. Enfin Hirn a mis en évidence le rodage qui intervient pendant la période de démarrage. Par ailleurs, à l'aide d'un système de refroidissement par circulation d'eau et en maintenant la température du bain d'eau constante à 1 °C près, Hirn détermine le rapport entre le travail mécanique et la calorie ; compte tenu des unités utilisées il trouve que l'équivalent mécanique de la kilocalorie est compris entre 350 kg.m (3 434 J) et 450 kg.m (4 415 J) ; il retient la valeur de 370 kg.m (3 630 J) obtenue dans la plupart des cas. On sait maintenant que cette valeur est trop faible ; à la même époque Mayer obtenait 365 kg.m (3 580 J) et Joule 417 kg.m (4 090 J).

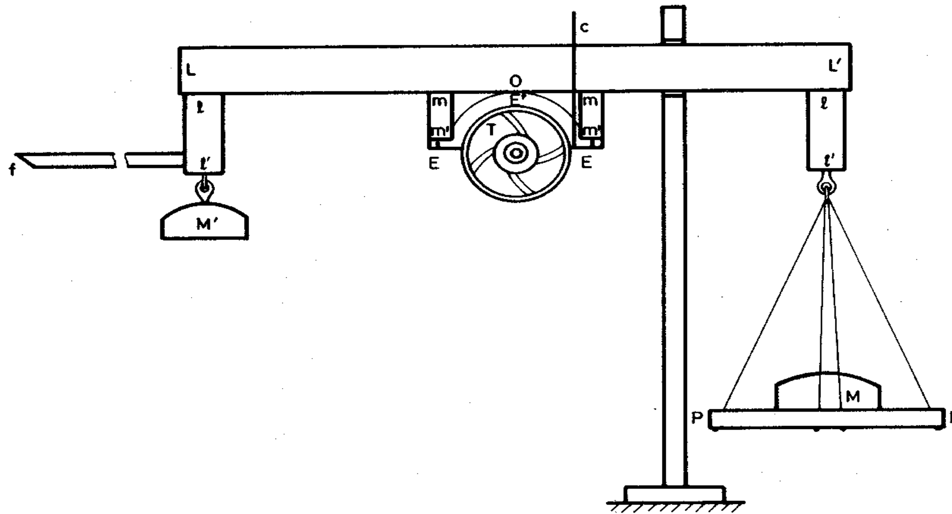


Fig. 17 : Schéma du dispositif d'essai utilisé par G. Hirn. [11].

Les résultats obtenus par Hirn sur le frottement hydrodynamique sont en opposition totale avec les lois de Coulomb, aussi l'Académie des Sciences en France en 1849 et la Royal Society en Angleterre refusèrent successivement de les accepter ; ils ne furent publiés qu'en 1854 dans le Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse où on peut encore les consulter.

En 1879, Robert Henry Thurston (1839-1903) qui devient l'année suivante le premier Président de l'« American Society of Mechanical Engineers » publie le résultat de ses études sur le frottement et la lubrification. Il montre que lorsque la vitesse augmente, le coefficient de frottement d'un palier lubrifié décroît au-dessous de la valeur statique, passe par un minimum puis augmente ensuite avec la vitesse. Il remarque aussi que la vitesse qui correspond au minimum de frottement, dépend de la charge appliquée au palier. En 1885, R. Thurston publia l'ensemble de ses études dans « A treatise on friction and lost work in machinary and millwork ». Ce livre dédicacé à G. Hirn connu un grand succès et fut réédité 7 fois entre 1885 et 1907.

En 1883 Nikolai Pavlovich Petrov (1836-1920) présente le résultat de ses études et essais sur le frottement des paliers lubrifiés. Il montre que de toutes les caractéristiques physiques d'une huile, seule la viscosité joue un rôle prépondérant sur le frottement des paliers. Il précise qu'un film liquide sépare totalement les surfaces de l'arbre et du coussinet et que dans ce film doit régner une pression qu'il suppose constante. Il analyse par ailleurs les travaux de G. Hirn et reprend pour caractériser la lubrification hydrodynamique le terme de frottement médiat proposé par G. Hirn. Enfin, et c'est sans doute sa contribution la plus importante, il démontre que le frottement F du palier est proportionnel à la vitesse V, à la surface du contact Q et à la viscosité μ ; il propose la relation :

$$F = \frac{\mu V Q}{\varepsilon + \frac{\mu}{\lambda_1} + \frac{\mu}{\lambda_2}}$$

où ε est l'épaisseur moyenne du film lubrifiant et λ_1 et λ_2 des coefficients introduits pour prendre en compte un éventuel glissement du fluide aux parois. Cette loi approchée dans le cas général, est exacte pour un palier non chargé, avec $\frac{\mu}{\lambda_1} + \frac{\mu}{\lambda_2} = 0$ car il n'y a pas de glissement aux parois. Elle porte le nom de Loi de Petrov. Par ailleurs, à l'aide d'une analyse thermique globale, N. Petrov montre que pour un palier donné fonctionnant à une vitesse connue et pour un lubrifiant donné, le frottement dépend directement de la température. La valeur du frottement peut être calculée pour n'importe quelle température si l'on connaît la courbe viscosité température du fluide et le frottement à une température donnée. Ce dernier résultat n'est qu'approché car il ne tient pas compte de l'effet de la variation de la viscosité sur la portance du palier. Pour vérifier sa théorie, N. Petrov a effectué de nombreux essais sur des paliers de roues de wagon de chemin de fer pour des températures comprises entre - 6 °C et + 26 °C.

En Angleterre en 1882, « the Institution of Mechanical Engineers » engage Beauchamp Tower (1845-1904) pour réaliser des essais sur la lubrification des paliers. Dès 1883, B. Tower présente dans un premier rapport ses résultats obtenus sur le frottement et constate, qu'ils correspondent mieux aux lois du frottement liquide qu'à celles du frottement solide données par les lois de Coulomb. En effet, le frottement varie peu avec la charge, il augmente avec la vitesse et diminue rapidement lorsque la température augmente. Il montre par ailleurs, la présence d'un film lubrifiant entre les surfaces de l'arbre et du coussinet ainsi que l'existence d'une génération de pression dans ce film. La mise en évidence de cette génération de pression dont l'importance est capitale, a été fortuite : la rainure d'alimentation du palier étudié était placée par erreur, mais c'était souvent l'usage à l'époque, dans la zone chargée ; ainsi l'huile était évacuée du palier à partir de la rainure par le tube d'alimentation. B. Tower pour arrêter cette fuite obtura le tube d'abord avec un bouchon en liège puis en bois mais à chaque fois, la pression hydrodynamique chassait le bouchon. Un manomètre permettant des mesures jusqu'à 14 bars fut alors vissé à la place du bouchon ; en quelques instants, l'aiguille atteignit la valeur maximale alors que la pression moyenne calculée à partir de la charge n'était que de 7 bars. Ainsi, l'existence d'une pression hydrodynamique dans un palier était prouvée pour la première fois. A la suite de cette observation, B. Tower montre que pour assurer de bonnes conditions de fonctionnement, il fallait que les rainures soient placées dans les zones non chargées du palier et laisser l'arbre entraîner l'huile dans la zone de pression. Dans un second rapport présenté en 1885, B. Tower donne la répartition de pression mesurée à la surface du coussinet ; l'intégration de cette pression permet de retrouver la charge avec une erreur de seulement 2 %, ce qui est remarquable.

Les études expérimentales de B. Tower, qui pour la première fois ont mis en évidence l'existence d'une pression hydrodynamique dans le film lubrifiant d'un palier, ont permis le développement de la théorie de la lubrification. En effet, c'est au XIXe siècle, que les bases de la lubrification moderne ont été établies. En 1822, le mathématicien Claude Louis Marie Henri Navier (1785-1836), à la suite des travaux d'Euler, présente dans un rapport à l'Académie des Sciences, les équations générales du mouvement d'un fluide en tenant compte pour la première fois, du frottement intérieur du fluide, c'est-à-dire de la viscosité. Ces lois sont toujours utilisées aujourd'hui et sont connues des mécaniciens des fluides sous le nom

d'équations de Navier-Stokes, car Stokes, le premier, les a intégrées dans différents cas relativement simples.

Entre 1840 et 1846, Jean Louis Marie Poiseuille (1799-1869) établit les équations qui gouvernent l'écoulement d'un fluide dans un tube de faible diamètre afin de décrire l'écoulement du sang dans les vaisseaux. Ces lois très utilisées en lubrification, on parle aujourd'hui d'écoulement de type Poiseuille, ont été confirmées indépendamment quelques années plus tard par Hagen en Allemagne. Elles sont usuellement connues sous le nom de loi de Hagen-Poiseuille. Le nom de Poiseuille a d'ailleurs été donné à l'unité de viscosité dynamique dans le système M.K.S.A. De même, depuis 1913, la Poise est utilisée pour désigner l'unité de viscosité dynamique dans le système C.G.S.

C'est Osborne Reynolds (1842-1912), très connu pour ses études des écoulements turbulents qui, dans un article publié en 1886, établit les bases de la lubrification hydrodynamique actuelle dans le but d'expliquer les résultats expérimentaux de Tower.

Dans la première partie de son étude, Reynolds discute les résultats de Tower. Il montre que lorsqu'un film de lubrifiant sépare totalement les surfaces, le frottement n'est pas proportionnel à la vitesse car l'élévation de température dans le film entraîne une diminution de la viscosité et donc du frottement. Il suggère que dans les expériences réalisées par Tower, les rayons de l'arbre et du coussinet sont différents et que l'épaisseur minimale du film est située en aval de la ligne de charge. Par ailleurs, il note que lorsque la charge augmente, la pression dans la zone de sortie du film devient négative, ce qui entraîne la rupture du film.

Dans une seconde partie de son mémoire, Reynolds analyse les écoulements simples entre deux plaques parallèles puis inclinées. Il donne une explication physique du phénomène de portance dû à la conservation du débit dans le coin d'huile. Enfin, il explique la nécessité du rodage par l'existence des rugosités qui jouent un rôle dans la zone où l'épaisseur du film est la plus faible.

Dans la troisième partie de son travail, Reynolds présente les hypothèses de base de la lubrification hydrodynamique :

- l'épaisseur du film est très faible devant les autres dimensions,
- l'écoulement est laminaire,
- le lubrifiant obéit à la loi de Newton, sa viscosité est constante et il est incompressible,
- les forces massiques et les forces d'inertie dans le fluide sont négligées,
- la courbure générale du film est négligée,
- la vitesse du fluide selon l'épaisseur du film est très faible devant les autres vitesses ($v << u$ et w),
- les gradients de vitesse selon l'épaisseur du film sont prépondérants devant les autres.

Compte tenu de ces hypothèses, les équations de Navier-Stokes *(les notations sont celles utilisées par Reynolds)* se réduisent à :

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{dp}{dx} = \mu \dfrac{d^2 u}{dy^2} \\[2ex] \dfrac{dp}{dy} = 0 \\[2ex] \dfrac{dp}{dz} = \mu \dfrac{d^2 w}{dy^2} \end{array}\right\}$$

par intégration et, en supposant qu'il n'y a pas de glissement entre le fluide et les surfaces du contact, O. Reynolds obtient le champ de vitesse dans le fluide :

$$\left.\begin{aligned} u &= \frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dx}(y-h)y + U_0\frac{h-y}{h} + U_1\frac{y}{h} \\ w &= \frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dz}(y-h)y \end{aligned}\right\}$$

ces expressions reportées dans l'équation de continuité, intégrée à travers l'épaisseur du film donnent :

$$\frac{d}{dx}\left(h^3\frac{dp}{dx}\right) + \frac{d}{dz}\left(h^3\frac{dp}{dz}\right) = 6\mu\left\{(U_0 + U_1)\frac{dh}{dx} + 2V_1\right\}$$

Cette équation est connue depuis sous le nom d'équation de Reynolds, c'est l'équation de base de la lubrification hydrodynamique.

Dans la dernière partie de son mémoire, Reynolds a intégré cette équation dans le cas du coin d'huile infiniment long $\left(\frac{dp}{dz} = 0\right)$. Il a aussi proposé une solution dans le cas du palier infiniment long en utilisant des développements en série. Cependant, l'intégration est très laborieuse et la solution n'est acceptable que dans le cas des paliers très peu chargés.

6 - LA TRIBOLOGIE AU XXe SIÈCLE

L'analyse de toutes les publications et réalisations effectuées depuis le début du siècle dans le domaine de la tribologie représente un travail considérable qui dépasse largement le cadre de cet article. Cependant, un aperçu des progrès réalisés peut schématiquement être présenté. Nous utiliserons pour cela la classification actuelle et nous parlerons successivement de la lubrification hydrodynamique, hydrostatique et élastohydrodynamique, et du frottement sec.

La théorie de la lubrification hydrodynamique présentée par Reynolds en 1886, a été utilisée dès le début du XXe siècle pour le calcul des butées et des paliers.

En 1905, Anthony George Maldon Michell (1870-1959) obtient à l'aide de développements limités, la solution de l'équation de Reynolds dans le cas d'une butée de largeur finie. Il montre ainsi, la diminution de portance due aux fuites latérales du fluide. Dans le cas des paliers, les progrès ont été moins rapides. En 1904, Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951) utilise un changement de variables judicieux et présente une solution analytique à l'équation de Reynolds dans le cas du palier infiniment long $\partial p / \partial z = 0$. Cependant, les conditions aux limites proposées ne tiennent pas compte de la rupture du film dans le palier et la pression ainsi obtenue est négative dans la zone divergente, ce qui ne correspond pas à la réalité physique. En 1914, Ludwig Karl Friedrich Gümbel (1874-1923) propose pour le calcul de la charge dans le palier de ne prendre en compte que la partie positive de la pression et de négliger toute la zone où la pression est négative. La charge ainsi calculée est évidemment erronée. En 1932, Herbert Walker Swift (1894-1960) puis W. Stieber en 1933 présentent indépendamment, des conditions aux limites à la sortie du film plus représentatives de la réalité. Ils écrivent que dans la zone divergente du palier le film se rompt le long d'une frontière déterminée par les conditions supplémentaires suivantes : le long

de la frontière, la pression prend la valeur de la pression saturante du fluide et le gradient de pression s'annule. Ces conditions qui respectent la continuité du débit à la sortie du film, sont dites conditions aux limites de Reynolds et sont universellement utilisées aujourd'hui pour le calcul des paliers soumis à des charges constantes. Une méthode numérique de résolution de l'équation de Reynolds utilisant ces conditions, a été proposée par Christopherson dès 1941.

En 1931, Albert Kingsbury (1863-1943) obtient une solution approchée à l'équation de Reynolds, en utilisant une méthode analogique basée sur la similitude existante entre l'équation de Reynolds et l'équation qui décrit la loi de variation de la tension électrique dans un milieu résistif.

En 1953, Fred William Ocvirk (1913-1967) présente une méthode approchée pour le calcul des paliers courts. Il propose de négliger, dans l'équation de Reynolds, le gradient de pression circonférentiel devant le gradient de pression axial. La solution est analytique et utilise les conditions aux limites de Gümbel. Les résultats obtenus sont pratiquement exacts pour des paliers dont le rapport L/D de la longueur au diamètre est inférieur à 0,25. Cependant, cette méthode est encore utilisée aujourd'hui, dans le cas de charges variables, pour des paliers de rapport L/D de l'ordre de 0,5, car elle simplifie considérablement les calculs.

Les premières solutions numériques ont été proposées par Cameron et Wood en 1949, puis par Pinkus, Raimondi et Boyd en 1958.

L'importance des effets thermiques en lubrification hydrodynamique a été mise en évidence dès les premières études scientifiques, cependant la prise en compte de ces effets pour le calcul des mécanismes est récente. La première approche théorique de ce problème a sans doute été effectuée par Albert Kingsbury en 1933, mais c'est Duncan Dowson en 1962 qui, le premier, a présenté les équations générales de la lubrification thermohydrodynamique. Cependant, grâce aux progrès réalisés récemment, on commence aujourd'hui à résoudre dans la plupart des cas, les équations qui régissent les phénomènes thermiques en lubrification.

L'utilisation de fluides lubrifiants très peu visqueux ainsi que l'augmentation des vitesses et des dimensions des paliers et des butées entraînent des changements de régime dans l'écoulement du film lubrifiant. Ce phénomène, constaté par M. Couette dès 1890 dans le cas de l'écoulement entre deux cylindres coaxiaux, puis analysé par G. I. Taylor en 1923, a été mis en évidence dans les paliers par Donald Wilcock en 1950. L'étude de ces phénomènes non laminaires (tourbillons de Taylor et turbulence) a été effectuée dans les années 1960-1970, cependant pour certaines applications, cryogéniques par exemple, de nombreux problèmes restent à résoudre.

Du point de vue des réalisations technologiques, Michell en Australie, a déposé en 1905 le premier brevet sur le patin oscillant. Ce dispositif permet à la butée de toujours présenter une inclinaison qui correspond à la charge optimale du patin à condition que la position du pivot ait été bien choisie. Dans le même temps, aux Etats-Unis vers 1900, Kingsbury a inventé aussi le patin oscillant. Cependant, il n'a déposé une demande de brevet qu'en 1907 ; il faudra attendre jusqu'en 1910 pour que cette demande soit enregistrée après que Kingsbury ait prouvé l'originalité de son invention. Les butées et les paliers à patins oscillants ont tout d'abord été peu utilisés car leur fabrication est complexe mais leur emploi s'est généralisé aujourd'hui car, bien que d'un coût élevé, ils présentent d'excellentes caractéristiques de fonctionnement (capacités de charge et stabilité) et sont classés parmi les supports de ligne d'arbre les plus performants.

Un autre type de butée, la butée à saut ou butée échelon formée de 2 parties parallèles décalées, a été proposé en 1918 par John William Strutt, baron Rayleigh (1842-1919) qui montra que ce type de butée présente, pour une épaisseur minimale de film donnée, une capacité de charge supérieure à celle des autres types de butées connues. Ce type de palier

connaît actuellement un développement remarquable dans le cas des garnitures mécaniques d’étanchéité à gaz.

L'existence de la lubrification hydrostatique était connue avant le début de ce siècle. Ainsi, L. D. Girard en 1865, démontra le principe de la séparation des surfaces et de la réduction de frottement par injection d'huile sous pression. Par ailleurs, un système hydrostatique constitué d'un bloc massif supporté par quatre patins et reposant sur une plaque en acier, a été présenté à l'exposition industrielle de Paris en 1878. Ce dispositif, appelé le chemin de fer de glace, pouvait être déplacé sans frottement dès que la pompe injectait du fluide dans les quatre patins. Cependant, le calcul des performances de ces mécanismes ne peut se faire qu'à partir de la théorie de Reynolds.

En 1917, Lord Rayleigh fut le premier à présenter l'analyse d'un système hydrostatique et à calculer la charge et le couple de frottement d'une butée hydrostatique axiale.

L'avantage des systèmes hydrostatiques qui permettent d'assurer des guidages très précis, sans à-coup, sans usure et avec un frottement quasi indépendant de la charge, a été mis en évidence de façon spectaculaire lors de la réalisation du télescope de Mont Palomar. Ce télescope mis en service en 1947, a une masse de 470 000 kg et repose sur 6 patins hydrostatiques de 0,5 m^2 de surface chacun. Le moteur utilisé pour entraîner en rotation l'ensemble du télescope a une puissance de 62 W (1/12 hp). Le coefficient de frottement est inférieur à 10^{-6}. Il faut cependant ajouter à la puissance dissipée par frottement, la puissance de la pompe qui injecte le fluide sous pression dans les alvéoles des butées hydrostatiques. Cette puissance de 2,5 kW reste très raisonnable comparée à la masse du télescope mise en mouvement. Le télescope du pic du midi est lui aussi supporté par des butées hydrostatiques.

Aujourd'hui, les systèmes hydrostatiques sont utilisés dans les machines outils de précision et les appareils de mesure ainsi que dans les cas où le mouvement relatif des surfaces ne permet pas de créer une portance suffisante pour assurer un bon fonctionnement du mécanisme (paliers hybrides). Une application peu connue mais remarquable des paliers hybrides, est le palier guide des pompes primaires des réacteurs nucléaires N4 dont la durée de vie doit excéder 30 ans.

La possibilité d'utiliser de l'air et plus généralement des gaz comme lubrifiant a été mise en évidence par Gustave Hirn avant 1854. Cependant, malgré les études réalisées en 1898 et le dispositif de démonstration mis au point en 1926 par AlbertKingsbury, ainsi que les brevets pris par Ferranti en 1904, ce n'est que depuis la seconde moitié du XXe siècle que l'emploi des paliers à gaz s'est généralisé. Ces dispositifs, qui peuvent être des systèmes aérostatiques ou aérodynamiques, sont réservés aux mécanismes de hautes précisions (métrologie) ou à très grande vitesse (fraises de dentiste, gyroscopes, turbines ...). Leur emploi reste cependant limité aux systèmes supportant de faibles charges.

Une application très remarquable des paliers à gaz est la tête de lecture des disques magnétiques des ordinateurs ; elle est supportée par un film d’air dont l’épaisseur est de quelques dizaines de nanomêtres (10^{-9} mètres). Les premières têtes de lecture sur film d’air ont été utilisées sur les ordinateurs IBM 1130 du début des années 1960. Elles ont été conçues par William Gross, à partir des études développées dans la thèse de Virgil N. Constantinescu, soutenue en 1955.

La lubrification élastohydrodynamique concerne tous les contacts pour lesquels la pression dans le film lubrifiant est suffisamment élevée pour déformer élastiquement les surfaces et modifier le comportement du lubrifiant. Ce type de contact correspond au contact entre les dentures des engrenages, à celui entre les corps roulants et les bagues d'un roulement à billes ou à rouleaux, à celui existant dans les systèmes came-poussoir...

L'étude du contact entre un cylindre et un plan, et entre une sphère et un plan qui schématise ces mécanismes, a été réalisée en l'absence de fluide par Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894) qui, en 1881, a présenté la théorie analytique pour calculer les contraintes et les

déformations dans le contact en l'absence de frottement. Cette théorie, connue depuis sous la théorie de Hertz, ne permet pas de décrire entièrement le comportement d'un contact lubrifié, car elle ne prend pas en compte l'effet du fluide, mais elle permet de calculer avec précision l'état de contrainte dans les matériaux.

En 1916, Martin présente l'étude du contact entre un cylindre et un plan dans le cas d'un écoulement bi-dimensionnel, en supposant les surfaces indéformables et la viscosité du fluide constante. La charge ainsi obtenue, est très inférieure à celle donnée par les résultats expérimentaux de l'époque. En 1945, Gatcombe et Grubin introduisent dans les calculs, l'augmentation de la viscosité des huiles avec la pression mise en évidence par les mesures de Hersey. Les résultats montrent que la pression dans le film tend vers l'infini, ce qui est physiquement impossible.

La première approche du problème élastohydrodynamique a été proposée par Grubin et Vinogradova en 1949. Cette analyse prend en compte la déformation élastique des surfaces calculée à l'aide de la théorie de Hertz et l'augmentation de la viscosité du lubrifiant avec la pression. La résolution de l'équation de Reynolds et des équations de l'élasticité est effectuée indépendamment et des hypothèses judicieuses permettent d'obtenir une solution au problème afin de calculer l'épaisseur minimale du film. La valeur obtenue n'est pas très éloignée de la valeur exacte connue depuis.

La première solution complète du problème élastohydrodynamique a été proposée en 1959 par Dowson et Higginson ; ces auteurs ont utilisé une méthode de résolution numérique itérative qui permet de coupler le calcul des déformations élastiques à celui de la résolution de l'équation de Reynolds. Depuis, l'utilisation des ordinateurs et le développement des techniques numériques ont permis de calculer avec précision ce type de contact, cependant l'effet des rugosités et surtout le comportement non newtonien des lubrifiants dans un contact hertzien font encore l'objet de nombreuses recherches.

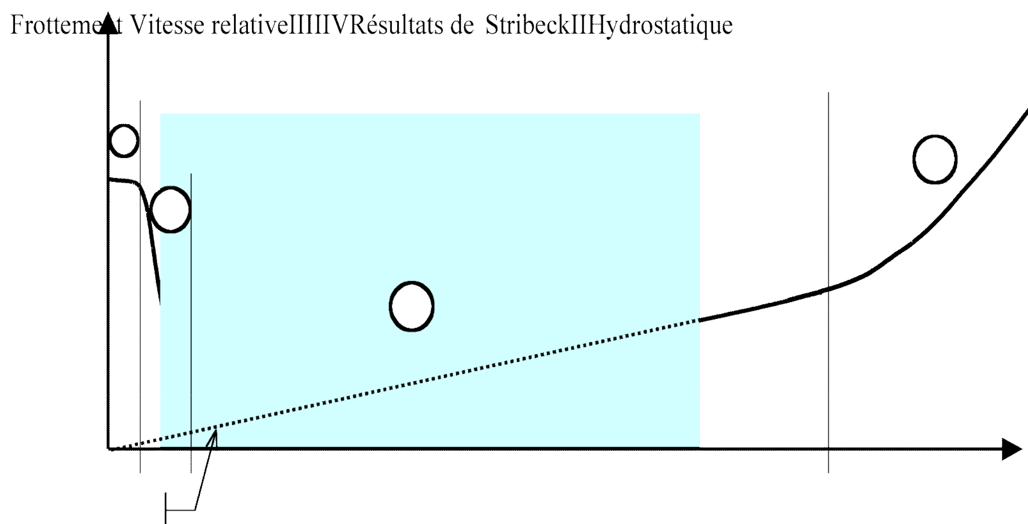


Fig. 18 : Courbe de Stribeck.

Il est commode aujourd'hui de présenter les différents types de lubrification à partir de la courbe de variation du frottement en fonction de l'épaisseur du film (fig. 18). Cette courbe qui a toujours la même allure quel que soit le type de contact lubrifié a été obtenue pour la première fois par Richard Stribeck (1861-1950) en 1902, elle porte aujourd'hui son nom. On distingue en général, 4 zones qui correspondent chacune à un type de lubrification dont la nature dépend aussi de la pression régnant dans le contact.

Dans le cas des contacts à basse pression (0,1 à 50 MPa), la zone I correspond à la lubrification limite ; la séparation des surfaces est assurée par des molécules d'huile absorbée.

Ce type de lubrification qui fait appel à la physicochimie des surfaces et des lubrifiants est possible à faible vitesse ou à vitesse modérée et pour des charges relativement faibles. Dans la zone II, l'effet hydrodynamique décrit par l'équation de Reynolds prend progressivement de l'importance et tend à séparer les surfaces qui restent encore en contact sur une partie de leurs aspérités, ce type de lubrification est la lubrification mixte. La zone III correspond à la lubrification hydrodynamique en régime laminaire dont l'analyse peut être effectuée à l'aide de l'équation de Reynolds et la zone IV à la lubrification hydrodynamique en régime non laminaire (Tourbillons de Taylor et Turbulence) dont nous avons déjà parlé. Dans ces zones, un film fluide sépare totalement les surfaces et en régime laminaire, le frottement serait proportionnel à la vitesse si la viscosité du lubrifiant ne diminuait pas lorsque la température augmente, c'est-à-dire lorsque la vitesse augmente.

Les régimes de lubrification I et II peuvent être supprimés si l'on injecte du lubrifiant sous pression dans le contact. On parle alors de lubrification hydrostatique. Dans ce cas le champ de pression dans le film est indépendant du mouvement relatif des surfaces. Des résistances hydrauliques placées à l'entrée du mécanisme permettent de réguler le comportement du palier ou de la butée hydrostatique qui, pour les fluides incompressibles, comportent généralement des alvéoles dont le but est de mieux répartir le champ de pression.

Dans les contacts à haute pression (jusqu'à 2 à 3 GPa), la zone I correspond à la lubrification extrême pression ; dans ce cas, les surfaces sont protégées par des films formés par réaction chimique des additifs « Extrême Pression » contenus dans l'huile et activés par les pressions, les contraintes de cisaillement et les températures existant dans le contact. Dans la zone II, on parle comme pour les contacts faiblement chargés, de lubrification mixte. Mais les phénomènes sont différents, c'est ici la transition entre la lubrification extrême pression et la lubrification élastohydrodynamique qui correspond à la zone III. La zone IV n'existe pas pour les contacts à hautes pressions.

Dans le domaine du frottement sec, les résultats de Coulomb sont encore utilisés aujourd'hui. Cependant, des progrès importants ont été réalisés à la suite des travaux de Holm en 1938, qui montrent que les aspérités en contact se déforment plastiquement et peuvent se souder ; ainsi la force de frottement est directement reliée aux contraintes de cisaillement des jonctions formées. Bowden et Tabor en 1939, précisent cette notion en faisant intervenir la dureté du matériau le plus mou. D'autres auteurs, dont Ernst et Merchant en 1940, montrent que les déformations des aspérités et l'effet de labourage doivent être pris en compte pour le calcul du frottement. Plus récemment, Bowden et Tabor en 1950, et Kragelskii en 1965, définissent la notion de surface réelle du contact. En effet, les surfaces d'un contact ne sont jamais géométriquement parfaites et la charge appliquée se répartit sur un petit nombre de sommets soumis à des déformations plastiques. La surface réelle est alors directement fonction de la charge appliquée et est indépendante de la surface apparente de contact. Rabinowicz en 1965, introduit de plus, la notion d'énergie d'adhérence des surfaces afin de préciser la valeur du frottement.

Les études sur l'usure, elles aussi très récentes, ont, pour la plupart été réalisées ces trente dernières années. Les phénomènes d'usure, qui naturellement ont un lien direct avec la dégradation des matériaux, ont été classés d'après la nature physique des processus mis en jeu. On distingue ainsi aujourd'hui, les usures par adhésion, abrasion, érosion, corrosion et fatigue. Cependant, on ne sait pas prédire avec précision, l'usure d'un mécanisme en frottement sec.

Récemment, à la suite de nombreuses observations, le modèle de contact à trois corps a été proposé en 1970, par Maurice Godet. Cette notion qui est quasi universellement admise aujourd'hui, consiste à considérer un contact sec comme formé de deux solides de comportement généralement élastoplastique et d'un film intercalaire dont malheureusement la rhéologie est très mal connue. Ce film intercalaire, nécessaire au bon fonctionnement d'un contact, peut provenir d'un revêtement initial, c'est le rôle des traitements de surface, mais

peut aussi être constitué de débris d'usure qui assurent une séparation entre les deux solides formant le contact.

BIBLIOGRAPHIE

[1] SINGER C. – "A history of technology". Clarendon Press 1954.

[2] LAYARD A. H. - "Discoveries in the ruins of Nineveh and Babylon". John Murray, 1853.

[3] DOWSON D. - "History of Tribology". Longmans, 1979. Second Edition, Professional Engineering Publishing, 1998.

[4] DRACHMAN A. G. - "Ancient oil mills and presses". Archaeol. Kunsthist. Medd, 1, N° 1, 1932, Munksgaard.

[5] RAZZAZ EL CEZERI - "Olaganüstü mekanik araçlarin bilgisi hakkinda kitap : le livre des dispositifs mécaniques ingénieux". Copie effectuée en 1990 du manuscrit datant de 1206 du Musée Topkapi – Istanbul n° 3472.

[6] TACCOLA – "De rebu militaris ou De machinis libri decem : Machines et Stratagèmes de Taccola", Ingénieur de la Renaissance présenté par Eberahard Knobloch.

[7] TRUESDELL C. - "Essays in the History of Mechanics". Springer-Verlag, Berlin, 1968.

[8] CIANCHI M. - "Les Machines de Léonard de Vinci". Becocci, Italie, 1984.

[9] FRANCE-LANORD A. - "Agricola de Re Metallica". Traduit de l'édition originale latine de 1556. Gérard Klopp, Thionville, 1987.

[10] COULOMB C. A. - "Théorie des machines simples en ayant égard au frottement de leurs parties et à la raideur des cordages". Imprimerie du Moutard. Paris, 1782.

[11] HIRN G. A. - "Etudes sur les principaux phénomènes que présentent les frottements médiats, et sur les diverses manières de déterminer la valeur mécanique des matières employées au graissage des machines". Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse, Tome 26, 1854.

[12] MORIN A. - "Notions fondamentales de mécanique et données d'expérience". Librairie Hachette, Paris, 1860.

[13] DUGAS R. - "Histoire de la Mécanique". Dunod, Paris et du Griffon, Neuchâtel, 1950.

[14] FULLER D. D. - "Theory and Practice of Lubrication for Engineers". John Wiley and Sons, New York, 1956.

[15] BURSTALL A. F. - "A History of Mechanical Engineering". Faber and Faber, Londres, 1963 et 1970.

[16] CAMERON A. - "The Principles of Lubrication". Longmans, Londres, 1966.

[17] GILLES B. - "Histoire des techniques". Encyclopédie de la Pléiade, 1978.

[18] ERRARD DE BAR-LE-DUC J. - "Le premier livre des instruments mathématiques mécaniques". Reproduction en fac-similé de l'édition de 1584, Berger-Levrault, 1979.